

基于DMD的超短焦微型投影镜头设计

丁伟 阳结根 胡枫 邹林儿

Design of ultra-short focal miniature projection lens based on DMD

DING Wei, YANG Jiegen, HU Feng, ZOU Liner

引用本文:

丁伟, 阳结根, 胡枫, 等. 基于DMD的超短焦微型投影镜头设计[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1294–1299. DOI: 10.5768/JAO202344.0601002

DING Wei, YANG Jiegen, HU Feng, et al. Design of ultra-short focal miniature projection lens based on DMD[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1294–1299. DOI: 10.5768/JAO202344.0601002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0601002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大孔径变焦投影镜头设计

Design of large aperture zoom projection lens

应用光学. 2018, 39(3): 405–411 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0305001>

小口径双通道球幕投影镜头的设计

Design of small-caliber dual-channel dome screen projection lens

应用光学. 2018, 39(6): 890–895 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0605003>

大孔径大视场变焦投影镜头设计

Design of zoom projection lens with large aperture and wild view

应用光学. 2018, 39(3): 412–417 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0305002>

基于DMD的大视场长出瞳距星模拟器光学系统设计

Design of optical system based on DMD for simulator with large field of view and long exit pupil distance

应用光学. 2020, 41(5): 891–897 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501003>

基于4k分辨率小型投影机的鱼眼镜头设计

Fisheye lens design based on small-sized projector with 4k resolution

应用光学. 2020, 41(5): 1060–1066 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0505002>

高清针孔镜头光学系统设计

Design of high-definition pinhole lens optical system

应用光学. 2021, 42(2): 223–228 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0201003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1294-06

基于 DMD 的超短焦微型投影镜头设计

丁 伟, 阳结根, 胡 枫, 邹林儿

(南昌大学 物理与材料学院, 江西 南昌 330000)

摘 要: 针对现有的大多数超短焦投影设备成本高、体积大、垂轴色差和畸变校正困难等问题, 设计了一款基于 DMD 芯片的超短焦微型投影镜头, 并对其进行了公差分析和热分析。该系统由 7 片镜片组成, 大大简化了结构并降低了成本。系统的 F 数为 1.7, 焦距为 1.65 mm, 系统总长 79.39 mm, 投射比达到 0.16, 具有大孔径、大视场、小型化等特点。设计结果表明: 系统全视场的调制传递函数 (MTF) 在空间截止频率 93 lp/mm 处均大于 0.65, 接近衍射极限; 系统的垂轴色差控制在 $1.2\ \mu\text{m}$ 以内, 最大畸变为 -2.17% , 全视场相对照度大于 0.95, 满足设计要求。

关键词: 光学设计; 超短焦; 投影镜头; DMD 芯片

中图分类号: TN202; O43

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0601002

Design of ultra-short focal miniature projection lens based on DMD

DING Wei, YANG Jiegen, HU Feng, ZOU Liner

(School of Physics and Materials, Nanchang university, Nanchang 330000, China)

Abstract: In order to solve the problems of high cost, large volume, vertical color difference and distortion correction for most existing ultra short focal projection equipment, an ultra-short focal micro projection lens based on DMD (digital micro-mirror device) chip was designed, and its tolerance analysis and thermal analysis were carried out. The system consists of 7 lenses, greatly simplifying the structure and reducing the cost. The F number of the system is 1.7, the focal length is 1.65 mm, the optical length is 79.39 mm, the projection ratio is 0.16, and the system has the characteristics of large aperture, large field of view and miniaturization. The design results show that the MTF (modulation transfer function) of the full field of view is larger than 0.65 at the space cutoff frequency of 93 lp/mm, which is close to the diffraction limit. The vertical color difference of the system is controlled within $1.2\ \mu\text{m}$, the maximum distortion is -2.17% , and the full-field relative illuminance is greater than 0.95, which satisfy the design requirements.

Key words: optical design; ultra-short focal; projection lens; DMD chip

引言

相较于传统投影仪而言, 超短焦投影仪只需要极小的工作距离就能获得大画面尺寸, 大大减小了对使用空间的要求, 并且解决了投影画面容易被障碍物遮挡的问题, 具有较大的发展潜力^[1]。但是要想达到理想的效果, 需要更复杂的结构和更多数量的镜片, 因此系统的体积和成本也会相应

地提高, 目前大多数超短焦投影镜头的镜片数量都在 9 片以上^[2]。除此之外, 大视场下像差校正也是难点, 大多数超短焦投影镜头往往存在畸变大、垂轴色差严重、场曲大等问题^[3]。为确保成像质量, 超短焦投影镜头在设计时通常会选择缩小光圈。目前市面上大多数超短焦投影镜头, 如坚果智慧墙 O1、峰米 R1 Nano 等 F 数通常在 2.4~2.7

收稿日期: 2022-11-15; 修回日期: 2023-04-16

基金项目: 国家自然科学基金 (62165008); 江西省自然科学基金 (20212ACB201007)

作者简介: 丁伟 (1998—), 男, 硕士, 主要从事光学设计研究。E-mail: 2679934542@qq.com

通信作者: 邹林儿 (1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事集成光学与光波导技术、太赫兹器件制备及检测应用、光学设计等研究。E-mail: Linerzou@ncu.edu.cn

之间,甚至更大,无疑会导致像面亮度降低低^[4]。

目前,国内对于超短焦投影镜头有很多相关的研究。2019年,贺天赐设计了一款共轴大口径超短焦投影镜头^[5];2019年,于百华等人提出了一种多视场的优化迭代设计方法^[6];2021年,郑秋水设计了一种折反射型超短焦投影系统^[7]。本文设计了一种使用 DMD 芯片的共轴超短焦微型投影镜头,系统总长为 79.39 mm, F 数为 1.7,投射比达到 0.16。在不缩小光圈的前提下,使用更少数量的镜片达到了更低的投射比,且减小了系统的体积。除此之外,该系统在像差校正方面取得了较好的结果,最大畸变为-2.17%,垂轴色差控制在 1.2 μm 之内,像质优异。

1 设计过程

1.1 设计目标

DLP 投影技术具有亮度高、分辨率高、色彩范围丰富等优点^[8]。本文的设计基于型号为 DLP 4710 的 DMD 芯片,该芯片对角线尺寸为 11.938 mm (0.47 inch),单个像素直径为 5.4 μm ^[9]。图 1 是德州仪器公司对不同像元尺寸的 DMD 芯片在可见光波段的衍射效率归纳图^[10]。从图 1 可以看出, F 数为 1.7 时, DMD 芯片的衍射效率大于 0.85,满足实际使用需求。

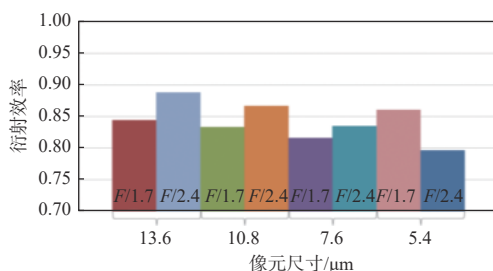


图 1 不同像元尺寸的 DMD 芯片在可见光波段的衍射效率

Fig. 1 Summary of diffraction efficiency of DMD chips with different pixel sizes in visible light band

本文设计目标是,在 350 mm 距离内投射出 100 inch (2 214 mm×1 245 mm) 的画面。整个系统采用反向设计的思路,即将 DMD 芯片置于像方焦平面上,平行光通过透镜成像于 DMD 芯片上^[11]。经过计算可得镜头的各项参数如下^[12]:

镜头放大倍率 M 为

$$M = \frac{S}{D} = \frac{0.47}{100} = 0.0047 \quad (1)$$

镜头焦距 f 为

$$f = \frac{L}{\frac{1}{M} - 1} = \frac{350}{\frac{1}{0.0047} - 1} \approx 1.65 \text{ mm} \quad (2)$$

镜头视场角 $2w$ 为

$$2w = 2 \arctan \frac{\sqrt{W^2 + H^2}}{L} \approx 149^\circ \quad (3)$$

镜头投射比 T_R 为

$$T_R = \frac{L}{W} = \frac{350}{2214} \approx 0.16 \quad (4)$$

式中: S 为 DMD 芯片的对角线尺寸; D 为投影屏幕的尺寸; L 为投影距离; W 、 H 分别为投影画面的宽度和高度。

此外,为保证投影系统能够正常工作,投影镜头和 DMD 芯片的分辨率必须相匹配。芯片的分辨率可以根据式(5)计算^[13]:

$$V = \frac{1}{2 \times \text{单位像素尺寸}} \approx 93 \text{ lp/mm} \quad (5)$$

因此,必须保证镜头在频率 93 lp/mm 处有足够的对比度和亮度,才能确保最终的成像质量良好。在使用 Zemax 进行设计时,至少应确保系统全视场的 MTF 值在 46.5 lp/mm 处不小于 0.5,在 93 lp/mm 处不小于 0.3^[14]。系统的各项参数如表 1 所示。

表 1 系统的各项参数设计指标

Table 1 Design indices of system

系统参数	设计指标
波长/nm	380~760(可见光波段)
焦距/mm	1.65
视场角/(°)	149
$F/\#$	1.7
投射比	0.16
相对畸变/%	≤ 3
MTF(@93 lp/mm)	≥ 0.3

1.2 系统选型和优化

本文需要设计一款低成本、小型化、高像质的超短焦微型投影镜头,因此尽量减少镜片数量以缩小系统体积。但难点在于使用较少数量的镜片在优化过程中自由度更小,会给像差校正带来困难。除此之外,大视场系统会存在较大的球差、畸变等像差。结合优化过程中系统各表面的赛德尔系数,将对像差贡献最大的 2 个面设置为非球面,可以有效提高像差校正效率,同时也能减少系统中元件数量。另外,考虑到投影仪光源在工作中

会产生大量的热量,因此系统镜片均采用具有更低热膨胀系数的玻璃材料。

首先,按设计要求设置好系统的工作波段、视场、孔径等参数,依据经验对各镜片的材料、曲率半径等进行设置,确定初始结构之后再从玻璃库中选取折射率相近的材料进行替换^[15]。同时,还应考虑实际加工能力和组装精度要求,合理控制镜片厚度和空气间隔。在评价函数编辑器中使用操作数对系统的焦距、后焦、总长等参数进行约束,将各透镜的曲率半径、厚度、非球面系数等参数设置为变量,进行优化处理。

在优化过程中,先使用均方根半径作为优化标准进行优化,可以使系统各视场的点列图快速收敛,待获得较好的像质后,再使用对比度作为优化标准进行优化,可以使MTF曲线快速上升,起到事半功倍的效果^[16]。在优化过程中应始终关注各项像差的变化,确保控制在合理的范围之内。

1.3 设计结果

通过上述过程对系统进行优化调整后,最终得到了1个性能优良的结构,如图2所示。该结构由5片球面镜片、2片非球面镜片、1片棱镜和1片保护玻璃组成。系统焦距为1.65 mm, *F*数为1.7,系统总长为79.39 mm。各镜片的定心系数都大于0.15,容易加工,镜片尺寸从右向左依次递增,易于装配,可以达到更高的配合精度,且组装偏心更小。

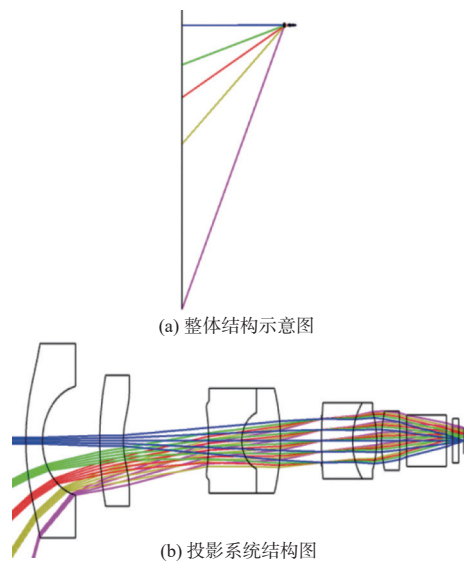


图2 系统结构示意图
Fig. 2 System structure diagram

各镜片的基本参数如表2所示。非球面面型

参数如表3所示,其中*K*为圆锥系数,*A*₄、*A*₆、*A*₈、*A*₁₀为非球面的高次项系数。

表2 各镜片的基本参数
Table 2 Basic parameters of each lens

表面编号	表面类型	曲率半径/mm	厚度/mm	材料	热膨胀系数(×10 ⁻⁶ /°C)
1	偶次非球面	26.004	3.036	N-BAF10	6.18
2	标准面	7.731	10.456		
3	偶次非球面	38.687	4.281	H-LAF1	7.1
4	偶次非球面	9.674	15.546		
5	标准面	-32.66	6.061	LASF14A	5.9
6	标准面	4.134	7.047	H-ZLAF57	7.3
7	标准面	-23.921	7.509		
8	光阑	Infinite	0	—	
9	标准面	50.075	5.677	SF59	9.8
10	标准面	8.680	4.367	H-LAK50	6.3
11	标准面	-11.789	0.905		
12	标准面	14.998	3.356	H-LAF1	7.1
13	标准面	-57.912	1.257		
14	标准面	Infinite	7.000	H-K9L	7.6
15	标准面	Infinite	1.000		
16	标准面	Infinite	1.000	BK7	7.1
17	标准面	Infinite	1.000		

表3 非球面面型参数
Table 3 Surface shape parameters of aspheric surface

表面编号	<i>K</i>	<i>A</i> ₄	<i>A</i> ₆	<i>A</i> ₈	<i>A</i> ₁₀
1	-2.282	-2.969×10 ⁻⁶	-7.334×10 ⁻⁸	-2.721×10 ⁻¹⁰	7.211×10 ⁻¹²
3	-0.266	-7.181×10 ⁻⁴	-2.206×10 ⁻⁷	-4.458×10 ⁻⁸	8.935×10 ⁻¹⁰
4	-0.860	-2.080×10 ⁻⁴	-6.826×10 ⁻⁶	-3.028×10 ⁻⁷	6.533×10 ⁻⁹

系统MTF曲线图如图3所示。从图3可以看出,在46.5 lp/mm处全视场MTF值大于0.84,在93 lp/mm处全视场MTF值大于0.65,接近衍射极限,满足成像要求,具有良好的对比度。

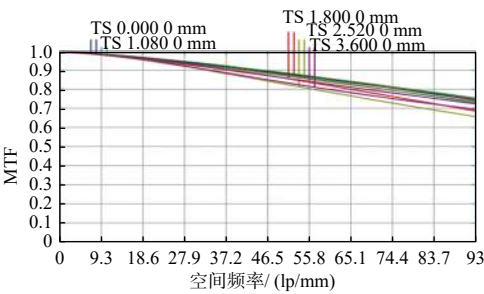


图3 系统MTF曲线图
Fig. 3 MTF curve of system

系统的垂轴色差如图 4 所示。从图 4 可以看出, 系统的垂轴色差控制在 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 小于 0.3 个像素尺寸, 满足投影镜头对垂轴色差的要求 (一般要求小于 1 个像素尺寸), 具有低色差特性。

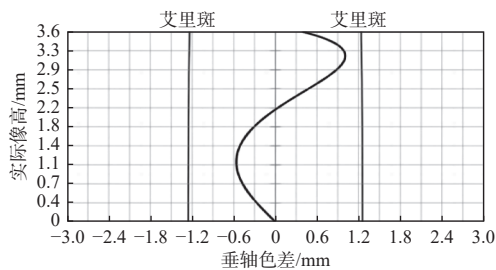


图 4 系统的垂轴色差图

Fig. 4 Vertical axis chromatic aberration diagram of system

系统的相对照度图如图 5 所示。从图 5 可以看出, 系统全视场相对照度高, 图像亮度均匀。投影系统的相对照度越高, 抗环境光能力越强, 在白天或有灯光的情况下成像更加清晰^[17]。

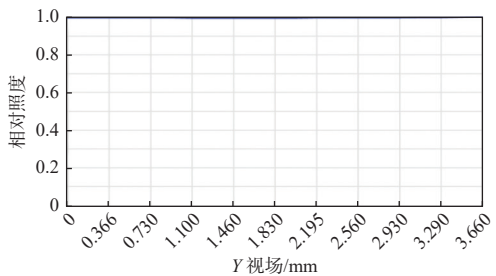


图 5 系统的相对照度曲线

Fig. 5 Relative illuminance curve of system

系统的网格畸变图如图 6 所示。一般而言, 畸变小于 3% 人眼就无法识别^[18], 本系统的最大畸变仅为 -2.17% , 满足设计要求。

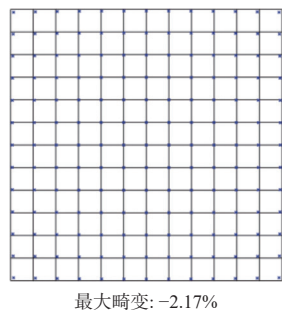


图 6 系统的网格畸变图

Fig. 6 Grid distortion diagram of system

2 热分析

投影仪在工作中会产生大量热量, 导致工作温

度快速上升, 甚至远高于环境温度。镜片的厚度以及镜头各元件之间的间距可能会由于材料的热胀冷缩而发生变化, 从而对光学系统的性能产生影响。因此, 系统中各镜片均使用热膨胀系数较低的玻璃材料, 如表 2 所示。镜筒材料使用殷钢, 在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时热膨胀系数为 $1.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 受温度影响发生的形变极小。胶合镜片使用型号为 GBN-501 的光学光敏胶进行胶合, 该胶近无色透明, 机械强度高, 粘结性和耐高低温性能好, 其热膨胀系数为 $8.39\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。根据口径小于 20 mm 的镜片胶合时胶层厚度在 $0.005\text{ mm}\sim 0.02\text{ mm}$ 之间, 可计算出当温度变化 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 胶层厚度变化量在 $2.517\times 10^{-6}\text{ mm}\sim 1.007\times 10^{-5}\text{ mm}$ 之间, 对系统的影响极小。五三研究所光学胶组的实验结果表明^[19], 该光敏胶在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内进行高低温测试时胶层无变化, 不会出现脱胶、塌边等情况, 稳定性好。

通过设置多重结构, 在 $0\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内对系统进行热分析。不同温度下系统在 93 lp/mm 处的 MTF 值如表 4 所示。从表 4 可以看出, 在 $0\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 系统在 93 lp/mm 处全视场的 MTF 值均大于 0.65, 性能稳定, 受温度影响很小。

表 4 $0\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下系统在 93 lp/mm 处的 MTF 值

Table 4 MTF of system at 93 lp/mm at $0\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

温度/ $^{\circ}\text{C}$	子午MTF(@93 lp/mm)	弧矢MTF(@93 lp/mm)
0	0.650	0.716
10	0.661	0.718
20	0.667	0.719
30	0.666	0.720
40	0.663	0.708
50	0.660	0.696
60	0.651	0.678

3 公差分析

光学系统设计除了满足成像要求之外, 还需要满足实际加工能力的要求, 因此对其进行公差分析是必不可少的。根据目前国内加工工艺水平, 将公差按表 5 所示进行设置。表 5 中, TFRN 为曲率半径公差, 单位以光圈表示; TTHI 为镜片厚度公差; TSDY 为结构表面 Y 方向偏心公差; TSTY 为结构表面 Y 方向倾斜公差; TEDY 为光学元件 Y 方向偏心公差; TETY 为元件 Y 方向倾斜公差^[20]。

表 5 系统公差设定指标

Table 5 Tolerance values of system

参数	设定值
TFRN/fringes	3
TTHI/mm	0.02
TS DY/mm	0.01
TSTY/(°)	0.0167
TEDY/mm	0.01
TETY/(°)	0.05

将公差敏感度设置为 MTF, 对应的频率为 93 lp/mm。使用蒙特卡罗方法对 2 000 组随机镜头数据进行分析, 结果如表 6 所示。从表 6 可以看出, 90% 以上的样本在 93 lp/mm 处 MTF 值大于 0.545, 设计结果合理, 满足实际加工条件。

表 6 公差分析结果

Table 6 Tolerance analysis results

比例/%	MTF(>)
90	0.545
80	0.594
50	0.667
20	0.709
10	0.728

4 结论

本文基于投影仪的行业现状和需求, 利用 Zemax 软件设计了一款在可见光波段内工作, 使用 11.938 mm(0.47 inch) DMD 芯片, 焦距为 1.65 mm, F 数为 1.7, 总长为 79.39 mm, 投射比为 0.16 的超短焦微型投影镜头。实验结果表明: 镜头的各项参数均达到或超过了设计要求, 全视场 MTF 值在空间频率 93 lp/mm 处大于 0.65, 接近衍射极限; 系统的垂轴色差控制在 $1.2\ \mu\text{m}$ 之内, 全视场相对照度大于 0.95, 最大畸变为 -2.17% , 像质优异, 较好地解决了大视场情况下场曲畸变大、垂轴色差大等问题。与同类结构相比, 本系统使用更少数量的镜片达到了更小的投射比, 极大地简化了系统结构, 并缩小了镜头体积, 减少了生产成本。热分析结果表明, 系统在 $0\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 环境下性能稳定, 受温度的影响较小。最后, 公差分析结果表明, 该系统公差宽松, 结构紧凑, 符合现有加工条件, 易于加工。

参考文献:

[1] 刘旭, 李海峰. 现代投影显示技术[M]. 杭州: 浙江大学

出版社, 2009: 213-390.

LIU Xu, LI Haifeng. Modern projection display technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009: 213-390.

[2] 罗隆恒, 林祖伦. 基于数字光处理的微型投影设备设计[J]. 光学仪器, 2017, 39(1): 50-55.

LUO Longheng, LIN Zulun. Design of micro-projection equipment based on digital light processing[J]. Optical Instruments, 2017, 39(1): 50-55.

[3] 张超. 超短焦投影镜头的研究与设计[D]. 南京: 江苏大学, 2021.

ZHANG Chao. Ultra short focal research and design of the projection lens [D]. Nanjing: Jiangsu University, 2021.

[4] 刘宵婵, 陈琛, 李维善, 等. 通用型短焦投影镜头的设计[J]. 应用光学, 2016, 37(6): 907-912.

LIU Xiaochan, CHEN Chen, LI Weishan, et al. Design of general short focal projection lens[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(6): 907-912.

[5] 贺天赐. 共轴超短焦大孔径投影镜头设计[D]. 杭州: 中国计量大学, 2019.

HE Tianci. Design of coaxial ultra-short focal large aperture projection lens [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2019.

[6] 于百华, 田志辉, 苏东奇, 等. 超短焦投影系统中自由曲面的多视场优化迭代设计方法[J]. 光子学报, 2019, 48(3): 46-53.

YU Baihua, TIAN Zhihui, SU Dongqi, et al. Multi-field optimization iterative design method for free-form surface in ultra-short focal projection system[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(3): 46-53.

[7] 郑秋水. 折反射超短焦投影显示光学系统的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.

ZHENG Qiushui. Research on the optical system of foldreflection ultrashort focal projection display[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.

[8] 孔令来. 基于DMD的大屏激光投影系统薄型化技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2016.

KONG Linglai. Research on thinning technology of large-screen laser projection system based on DMD [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2016.

[9] Texas Instruments. DLP4710 0.47 1080 p DMD datasheet[EB/OL]. (2018-11-15) [2023-02-16]. <https://>

- www.ti.com/product/DLP4710.
- [10] Texas Instruments. DMD optical efficiency for visible wavelengths application report[EB/OL]. (2019-5-30) [2023-02-16]. <https://www.ti.com/lit/an/dlpa083a/dlpa083a.pdf>.
- [11] 代雨, 程欣, 张文明, 等. 基于DMD的大视场长出瞳距星模拟器光学系统设计[J]. *应用光学*, 2020, 41(5): 891-897.
DAI Yu, CHENG Xin, ZHANG Wenming, et al. Design of optical system for long pupil distance star simulator with wide field of view based on DMD[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 891-897.
- [12] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 363-371.
ZHANG Yimo. Applied optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 363-371.
- [13] 萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 7-15.
XIAO Zexin. Engineering optics design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 7-15.
- [14] 张杨柳, 苏宙平, 潘红响, 等. 自由曲面车载抬头显示器的光学设计及公差分析[J]. *光子学报*, 2020, 49(9): 1-12.
ZHANG Yangliu, SU Zhouping, PAN Hongxiang et al. Optical design and tolerance analysis of free-form surface vehicle head-up display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9): 1-12.
- [15] 郑国宪, 焦建超, 俞越, 等. 大视场大相对孔径日盲紫外告警光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(2): 159-164.
ZHENG Guoxian, JIAO Jianchao, YU Yue, et al. Design of solar-blind ultraviolet warning optical system with large FOV and large relative aperture[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 159-164.
- [16] 张润泽, 陈宇, 张家铭, 等. 长工作距变焦显微系统物镜设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 618003-1-6.
ZHANG Runze, CHEN Yu, ZHANG Jiaming, et al. Design of zoom microscope objective with long working distance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 618003-1-6.
- [17] 柳梦瑶. 基于人眼视觉系统的图像质量评价方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
LIU Mengyao. Image quality evaluation method based on human visual system research[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022.
- [18] 沈为民, 薛鸣球. 非球面眼镜片的像差分析和设计[J]. *光学学报*, 2002, 22(6): 743-748.
SHEN Weimin, XUE Mingqiu. Aberration analysis and design of aspheric lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(6): 743-748.
- [19] 第五三研究所光学胶组. 精密光学仪器用GBN—501光学光敏胶[J]. *工程塑料应用*, 1982(3): 8-12.
Fifty-third Institute of Optical Glue Group. GBN-501 optical photosensitive adhesive for precision optical instruments[J]. *Engineering Plastics Application*, 1982(3): 8-12.
- [20] 王洋, 王宁, 顾志远, 等. 小型化同心反射式手机镜头设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(11): 207-213.
WANG Yang, WANG Ning, GU Zhiyuan, et al. Design of miniaturization concentric reflective mobile phone lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 207-213.